UNIVERSAL
LIBRARY

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

182

EXPOSÉS DE RADIOACTIVITÉ
et Physique nucléaire

publiés sous la direction

Madame PIERRE CURIE
Professeur à la Sorbonne

II

L'ÉLECTRON POSITIF

PAR

IRÈNE CURIE et F. JOLIOT



PARIS
HERMANN & Cie, ÉDITEURS
6, Rue de la Sorbonne, 6

1934



L'ÉLECTRON POSITIF



LA découverte expérimentale de l'électron positif a eu son origine dans des recherches sur le rayonnement cosmique. Anderson (1) aux Etats-Unis annonça le premier la présence, parmi les rayons corpusculaires d'origine cosmique, qu'il observait par la méthode des trajectoires de brouillard de de Wilson, de particules de grande énergie chargées positivement. Un champ magnétique élevé de 18.000 gauss était établi dans la chambre à détente pour incurver les trajectoires des électrons et mesurer leur énergie cinétique. Les détentes étaient effectuées à intervalle de temps régulier et environ 1 % des photographies obtenues portaient la trace des trajectoires des corpuscules étudiés.

Les expériences faites par la méthode d'ionisation ont montré que la majeure partie de ces rayons de très grande énergie sont dirigés de haut en bas. Le sens de la déviation produite par le champ magnétique permet de déduire le signe de la charge portée par le corpuscule. Un certain nombre de trajectoires photographiées par Anderson étaient incurvées dans le sens d'une charge négative et étaient dues à des électrons. Cependant, un petit nombre d'autres présentaient une courbure en sens inverse indi-

quant, ou bien que les rayons venaient d'en bas, ce qui était peu probable, ou bien provenaient d'en haut mais portaient une charge positive.

Pour connaître avec certitude le sens du mouvement de la particule, Anderson a placé au milieu de la chambre à détente une lame de plomb destinée à ralentir les rayons qui la traversent. Le cliché 1 (Pl. I) représente une trajectoire d'un rayon qui provient certainement de la partie supérieure de l'appareil puisque son rayon de courbure, et par suite son énergie cinétique diminue en passant de haut en bas dans la lame de plomb ; cette trajectoire est courbée dans le sens d'une charge positive.

Enfin, certains clichés montraient la présence de deux trajectoires courbées en sens contraire, d'aspect analogue, semblant provenir d'un même point situé à la partie supérieure de la chambre.

Anderson crut d'abord que les corpuscules chargés positivement étaient des protons de très grande énergie. Cette supposition pouvait paraître surprenante *à priori*, car toutes les trajectoires de brouillard observées avaient le même aspect et on sait, qu'en général, celles dues aux protons se distinguent facilement par leur épaisseur de celles dues aux électrons. On sait, en effet, que le nombre de paires d'ions formés par *cm* de parcours par un électron et un proton ayant des énergies de quelques millions d'électron-volts sont très différentes. Le cliché 6 (Pl. III) en donne un exemple. Cependant, lorsque les énergies deviennent très grandes, de l'ordre de 100×10^6 *eV*., comme c'est souvent le cas pour les électrons de la radiation ultra-pénétrante, il n'existe plus qu'une très petite différence entre les ionisations spécifiques produites, et par suite entre les trajectoires de brouillard du proton et de l'électron. C'est cette raison qui pouvait justifier l'hypothèse

suivant laquelle les trajectoires courbées dans le sens d'une charge positive étaient tracées par des protons de très grande énergie.

Poursuivant ses expériences, Anderson annonça ensuite qu'une partie des rayons positifs observés devaient avoir une masse beaucoup plus faible que celle du proton et il leur donna le nom de positron.

Blackett et Occhialini (2) en Angleterre reprirent ces expériences en employant une méthode très ingénieuse. Deux compteurs à électrons du type Geiger-Muller, sont placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la chambre Wilson dont l'axe est horizontal. Lorsqu'un rayon corpusculaire chargé passe successivement dans les deux compteurs, il traverse nécessairement la chambre. La coïncidence des décharges dans les compteurs déclanche la détente avec un retard très faible et la trajectoire de brouillard du rayon peut être photographiée. Grâce à ce dispositif 80 % des clichés portent les traces des rayons étudiés, ce qui présente un avantage considérable sur la méthode ordinairement employée, qui, comme nous l'avons vu, ne fournit que 1 % de clichés utilisables. On voit souvent des rayons non incurvés par le champ magnétique relativement peu élevé qui était employé (2.000 gauss). Parfois l'on aperçoit une gerbe de trajectoires (shower) (Skobelzyn avait déjà signalé l'existence sur les clichés Wilson de plusieurs trajectoires d'origine cosmique ayant pris naissance simultanément), souvent plus de 20, semblant venir de la même région ; certaines sont incurvées dans le sens d'une charge positive ou négative, d'autres ne sont pas courbées. Ce phénomène remarquable est extrêmement complexe et on ne peut actuellement en donner une interprétation entièrement satisfaisante. Cliché 2 (Pl. I).

L'étude des trajectoires formant les gerbes permit à

Blackett et Occhialini d'affirmer l'existence parmi elles de particules de charge positive de masse beaucoup plus faible que celle des protons. En particulier, ils observèrent deux trajectoires courbées dans le sens d'une charge positive, pour lesquelles les valeurs de $H\rho$, produit du champ magnétique en gauss par le rayon de courbure en centimètres, sont respectivement 40.000 et 150.000 gauss-cm. Si ces deux trajectoires étaient dues à des protons, leurs longueurs seraient 0,2 et 3 cm. dans l'air normal, d'après ce que l'on sait sur la relation entre le parcours et l'énergie des protons. Les trajectoires envisagées traversent la chambre et ont par conséquent une longueur au moins égale à 12 cm. D'autre part, l'ionisation spécifique le long de ces trajectoires est la même que s'il s'agissait d'un électron négatif de même produit $H\rho$. Il n'y a donc aucun doute que ces particules ne sont pas des protons, mais des particules de masses voisines de celle de l'électron négatif, particules que l'on appellera, électrons positifs ou positons.

Production d'électrons positifs par matérialisation des rayons γ.

L'étude des électrons positifs résultant de la radiation cosmique est très difficile, car la source de rayonnement responsable de leur émission a une intensité très faible et nous ne pouvons pas agir commodément sur elle.

Blackett et Occhialini suggérèrent que certains phénomènes déjà observés avec les sources de radiation dont nous disposons, pouvaient être interprétés en admettant l'existence des électrons positifs. Il s'agit d'une part de l'absorption anormalement élevée des photons de grande énergie par les éléments lourds et d'autre part de l'obser-

vation que nous avions faite par la méthode des détentes avec champ magnétique, de trajectoires d'électrons semblant se diriger, s'ils sont négatifs, vers les sources émettant un rayonnement pénétrant composé de neutrons et de photons. C'est l'étude de ce second phénomène qui fut d'abord reprise dans plusieurs laboratoires.

L. Meitner et K. Philipp (3) d'une part, Chadwick, Blackett et Occhialini (4) d'autre part, confirmèrent l'existence des trajectoires que nous avions observées (5) avec des sources de glucinium irradié par les rayons α du polonium et montrèrent, en plaçant une lame de plomb à l'intérieur de la chambre Wilson, que les trajectoires de ces électrons sortaient en plus grand nombre de ce radiateur que partout ailleurs dans la chambre et étaient courbés dans le sens d'une charge positive.

Il y avait donc lieu de croire que le rayonnement complexe de neutrons et de photons émis par cette source provoquait l'émission d'électrons positifs lorsqu'il irradie une lame de plomb.

Ces expériences ne permettaient pas de conclure si ce phénomène était dû à l'action des neutrons ou à celle des photons et si le phénomène dépendait du radiateur.

Matérialisation des photons en électrons positifs et négatifs.

Nous avons entrepris de nouvelles expériences (6) en plaçant une forte source de neutrons et de photons (source de polonium, émettant $1,5 \times 10^6$ rayons par seconde dans l'angle 2π, placée contre une pastille de glucinium) contre un écran métallique fermant un orifice ménagé dans le cylindre de verre de la chambre (fig. 1). Les expériences ont été effectuées avec des écrans d'aluminium, de cuivre,

de plomb et d'uranium et ont donné les résultats suivants : On observe avec ces divers radiateurs l'émission d'électrons positifs et d'électrons négatifs. Cliché 4 (Pl. II). Les électrons négatifs proviennent en partie de l'absorption des

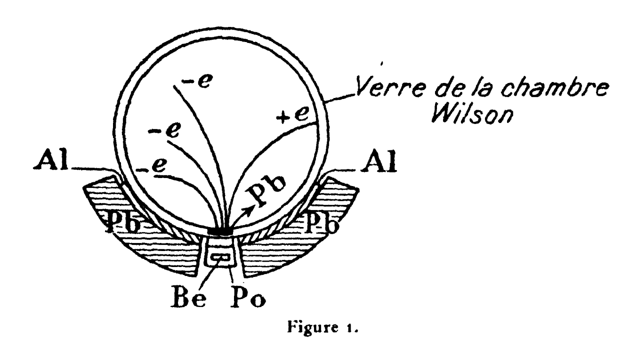


Figure 1.

photons par effet Compton. *Le rapport du nombre des électrons positifs au nombre des électrons négatifs émis augmente avec le numéro atomique du radiateur.* Le tableau ci-dessous représente approximativement la variation de ce rapport.

	Al	Cu	Pb	U
Nombre d'électrons positifs pour cent électrons négatifs (champ magnétique 1100 gauss........	5	18	30	40

Pour distinguer la nature du rayonnement responsable de l'émission des électrons positifs, nous avons étudié l'effet d'un écran de plomb de 2 cm. d'épaisseur, interposé entre la source et le radiateur de plomb, fermant l'orifice de la chambre à détente.

On observe une diminution de 40 % du nombre des électrons négatifs et positifs. On sait que l'interposition de cette épaisseur de plomb diminue environ de 50 % l'intensité du rayonnement γ ($h\nu = 5 \times 10^6\ eV$) et seulement de 12 % celle du rayonnement de neutrons émis par la source.

Nous pouvons donc *affirmer que la majeure partie des électrons positifs est due à l'action des photons* sur le radiateur.

La mesure des rayons de courbure des trajectoires de ces électrons permet de calculer leur énergie cinétique. Les courbes de la figure 2 représentent la distribution des énergies des électrons positifs et négatifs jaillissant d'un écran de plomb irradié par les photons d'énergie 5×10^6 *ev* excités dans le glucinium. L'énergie maximum des élec-

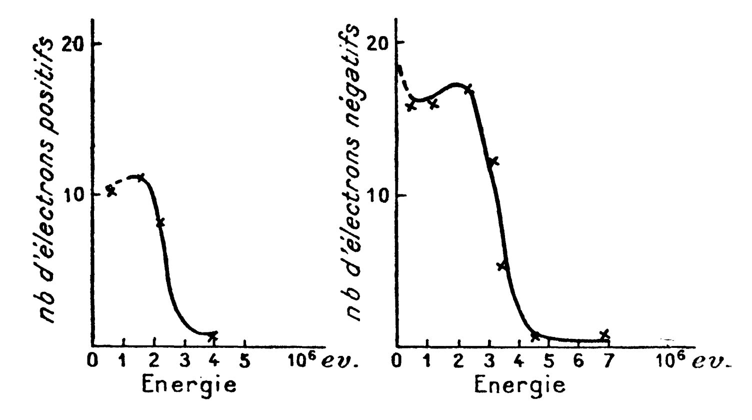


Figure 2.

trons positifs est voisine de 4×10^6 *ev* et celle des négatifs voisine de 5×10^6 *ev* (on a observé des rayons négatifs en très faible proportion ayant une énergie supérieure à 5×10^6 ; il n'est pas certain que l'on doive les considérer comme secondaires des photons émis par la source). Enfin, *l'énergie maximum des positons ne dépend pas de la nature du radiateur.*

Il était très probable, d'après ces résultats, que l'émission des électrons positifs par la matière n'était pas particulière aux photons de *Po* + *Be* mais que d'autres sources de rayons γ donneraient lieu au même phénomène.

Des expériences entreprises simultanément dans plusieurs laboratoires (7) ont montré qu'effectivement les rayons γ de *ThC''* d'énergie 2,65 × 10^6 *ev*, et *RaC'* (8) d'énergie comprise entre 1,0 et 2,2 × 10^6 e. V. donnaient lieu au même phénomène.

Dans nos expériences, une pastille de plomb placée à l'intérieur de la chambre Wilson est irradiée par un faisceau fin de rayons γ provenant d'une source de 3 mgr. de radiothorium filtré par 3 cm. de plomb. Le rayonnement se compose presque uniquement de photons d'énergie 2,65 × 10^6 *ev* et provenant de *ThC''*. On a disposé autour de la chambre une forte protection de plomb afin d'éviter la production d'électrons par les photons non compris dans le faisceau incident.

La proportion des électrons positifs par rapport aux électrons négatifs n'est dans ce cas que de 8 % (pour le radiateur *Pb*). La courbe de distribution des énergies des électrons positifs subit une chute vers 800.000 *ev* et la limite supérieure de l'énergie cinétique de ces électrons est voisine de 1,6 × 10^6 *ev*. Nous reproduisons ici (fig. 3) une courbe de distribution des énergies de ces électrons obtenue par Chadwick, Blackett et Occhialini (9).

Sur plusieurs de nos clichés comme sur ceux obtenus par Anderson, on peut observer plusieurs cas de trajectoires d'un électron positif et d'un électron négatif semblant provenir d'un même point de la pastille de plomb. Cependant, il est difficile d'affirmer que ces électrons forment une paire provenant réellement d'un même point dans le plomb. Nous avons pu photographier un cas où l'on voit apparaître dans le faisceau fin de rayons γ au sein du gaz de la chambre, une paire formée d'un électron négatif et d'un électron positif. Cliché 3 (Pl. 2). Dans ce cas,

très rare, les électrons n'ont pas pu subir de ralentissement appréciable, contrairement à ce qui peut avoir lieu dans le plomb, et la somme des énergies cinétiques $E_1 + E_2$ satisfait sensiblement à la relation :

$$E_1 + E_2 = h\nu - 10^6 \ eV$$

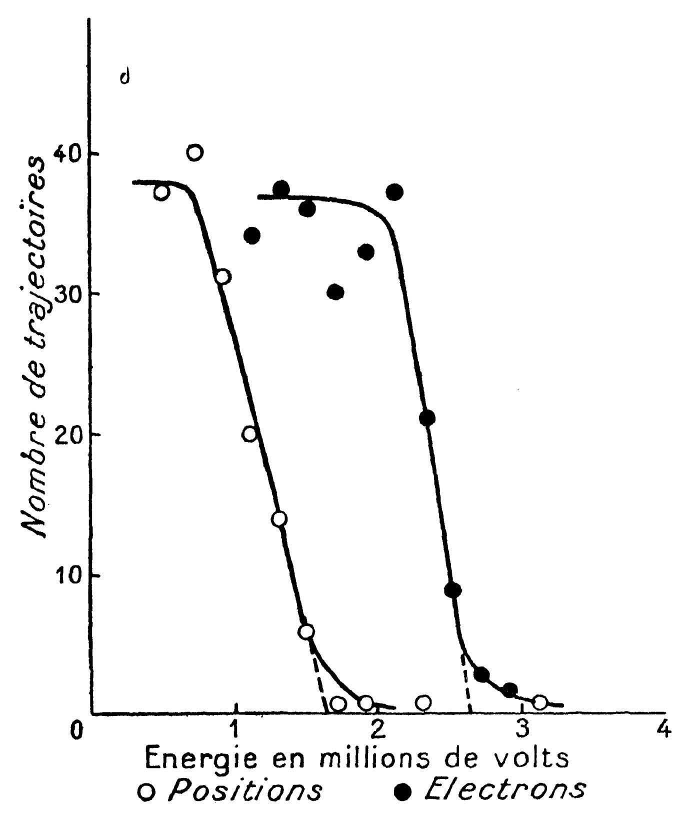


Figure 3.

Skobelzyn en examinant d'anciens clichés relatifs à l'étude des électrons Compton projetés par les photons de *ThC''*, a retrouvé quelques cas analogues au précédent.

Dans la plupart d'entre eux, le bilan énergétique est conforme à la relation ci-dessus.

L'ensemble des résultats numériques précédents et l'aspect de certains clichés montrant que les électrons positifs doivent être émis simultanément avec un électron négatif, font représenter ces phénomènes de la façon suivante :

Un photon de grande énergie rencontrant un noyau se transformerait en deux électrons de charge de signes contraires. La *matérialisation* des deux électrons, suivant l'expression proposée par Mme P. Curie, exige une dépense d'énergie équivalente à la somme des masses au repos des deux électrons. Si celles-ci sont rigoureusement égales, l'énergie dépensée est de $1{,}02 \times 10^6$ *ev* ; le surplus de l'énergie du quantum $h\nu - 1{,}02 \times 10^6$ apparaît comme énergie cinétique E_1 et E_2 des électrons créés selon le bilan suivant :

$$h\nu = 1{,}02 \times 10^6 + E_1 + E_2$$

L'énergie cinétique maximum E_{max} des positrons est conforme à la relation

$$E_{max} = h\nu - 1{,}02 \times 10^6$$

soit, pour $h\nu = 5 \times 10^6\ eV \qquad E_{max} = 4 \times 10^6\ eV$

$$h\nu = 2{,}65 \times 10^6\ eV \quad E_{max} = 1{,}6 \times 10^6\ eV$$

L'accord entre ces relations permet réciproquement de déterminer la masse de l'électron positif si l'on admet le processus de matérialisation ; la précision des expériences permet d'écrire l'égalité des masses au repos des électrons positifs et négatifs à 10 % près.

J. Thibaud (10) a entrepris des expériences pour comparer les rapports $\frac{e}{m}$ de la charge à la masse de l'électron positif et de l'électron négatif. Une source de positons et d'électrons négatifs est placée entre les pièces polaires

d'un électro-aimant dans la région marginale de champ variable. Les électrons s'enroulent suivant des cycloïdes se déplaçant le long d'un cercle ayant son centre sur l'axe des pièces polaires, comme l'avait autrefois montré Villard à propos des rayons magnéto-cathodiques. Les électrons sont ainsi concentrés sur un film placé dans une région diamétralement opposée à la source. Deux grilles laissant passer les électrons sont placées au-dessus du film et peuvent être portées à des tensions opposées de quelques milliers de volts. Suivant le sens et la valeur du champ électrique entre les grilles, la trace des électrons sur le film se déplace. La mesure du déplacement permet d'atteindre le rapport $\frac{e}{m}$.

La précision des mesures permet de conclure que le rapport $\frac{e}{m}$ pour le positon est compris entre la moitié et le double de celui de l'électron négatif.

Il résulte des considérations sur les électrons de matérialisation, qu'un photon d'énergie inférieure à $1{,}02 \times 10^6$ *ev* est incapable de provoquer l'émission d'électrons positifs. Or, c'est justement pour cette valeur du quantum que le phénomène d'absorption supplémentaire des rayons γ commence à avoir lieu, comme l'a montré W. Gentner (11) à l'Institut du Radium. Il est donc très probable que l'absorption supplémentaire observée pour les photons d'énergie supérieure à $1{,}1 \times 10^6$ *eV* est attribuable à la matérialisation des photons. Ce processus d'absorption peut prendre une importance prépondérante sur l'absorption par effet Compton, nous pensons que le coefficient d'absorption des rayons γ passe par un minimum et devient peut-être très élevé pour les radiations de très grande énergie quantique.

Ainsi s'il existe un rayonnement électromagnétique de

grande énergie dans la radiation cosmique il est probable qu'il ne peut parvenir à la surface de la terre, étant absorbé dans les couches d'air supérieures. Oppenheimer et Plesset (12) ont effectué des calculs théoriques sur cette question et sont arrivés à conclure que la pénétration des rayons γ de grande énergie quantique ne peut pas être beaucoup plus grande que celle des rayons γ de 5×10^6 *eV* excités dans *Be*.

La matérialisation d'un photon s'effectue dans le champ électrique au voisinage du noyau. Blackett, Chadwick et Occhialini (9) en examinant le rendement de la production des électrons positifs dans une lame de plomb irradiée par les photons d'énergie $2{,}65 \times 10^6$ *eV* calculèrent la valeur de la section dans laquelle peut s'effectuer la matérialisation. Cette valeur est $2{,}8 \times 10^{-24}$ cm² ce qui correspond à un diamètre 10 fois supérieur à celui du noyau ; les considérations théoriques conduisent à la valeur $2{,}6 \times 10^{-24}$ cm² en excellent accord. Les expériences montrent, en outre, que la probabilité de production d'un positon dans le plomb par matérialisation d'un photon de $2{,}65 \times 10^6$ *eV* (*ThC''*) est 20 à 30 % de la probabilité de production d'un électron par effet Compton et par effet photoélectrique. Cette valeur est suffisante pour expliquer l'ordre de grandeur du coefficient d'absorption supplémentaire de ces photons par le plomb.

Matérialisation interne des photons.

Nous venons de voir que les radiateurs de poids atomique élevé émettent une grande proportion d'électrons positifs sous l'action des rayons γ émis par une source polonium-glucinium. En plaçant près de l'orifice de la chambre à détente la source elle-même sans aucun radiateur (13),

on constate qu'elle émet directement des électrons positifs et négatifs. L'énergie cinétique des électrons positifs et négatifs est de l'ordre de quelques millions d'électron-volts. Le rendement de la production de ces électrons a une valeur suffisamment élevée pour qu'il soit impossible d'admettre qu'ils sont produits par matérialisation des photons dans les atomes voisins de glucinium, élément de numéro atomique faible. Nous expliquons cette émission, relativement intense d'électrons, en admettant que le photon se matérialise en sortant du noyau qui vient de se transformer. Le schéma de la réaction est le suivant :

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He = {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n + \varepsilon^{+} + \varepsilon^{-} $$

Le photon $h\nu$ subissant une *matérialisation interne* en sortant du noyau de carbone.

La probabilité de ce phénomène a été calculée théoriquement par Nedelsky et Oppenheimer (14) et la valeur trouvée s'accorde assez bien avec l'expérience. Cette probabilité diminuerait rapidement pour les éléments de numéro atomique croissant.

Autres processus de création des électrons positifs.

D'après les expériences de Chadwick, Blackett et Occhialini (9) il semble que les neutrons sont capables en traversant le plomb de provoquer l'émission d'électrons positifs. On ne possède pas encore de précision sur la nature de ce phénomène ; toutefois, le passage des neutrons dans le plomb s'accompagnant d'une émission de photons, les électrons positifs observés peuvent être dus à leur matérialisation.

Skobelzyn (15) a découvert un processus nouveau de créa-

tion d'électrons positifs en irradiant différents éléments avec des rayons β d'énergie supérieure à 10^6 *eV*. Le cliché 5 de la Pl. III représente la création d'une paire d'électrons positif et négatif à l'endroit où un électron négatif d'énergie $1,2 \times 10^6$ *eV* s'est brusquement arrêté. La somme des énergies cinétiques des électrons de la paire sont égales à 200.000 *eV*. Tout se passe comme si l'énergie cinétique de l'électron en mouvement s'était brusquement matérialisée en deux électrons, ce qui exige une dépense d'énergie de $1,02 \times 10^6$ *eV*. Dans un travail plus récent, Skobelzyn et Stepanowa (16) ont fait les observations suivantes :

Lorsqu'on absorbe, dans un élément donné, un faisceau d'électrons négatifs d'énergie supérieure à 10^6 *eV*, on observe une émission d'électrons positifs d'autant plus intense que l'élément irradié est plus léger. On s'attendrait, *a priori*, à une augmentation du rendement avec le numéro atomique. On pourrait expliquer cette augmentation du rendement de la façon suivante :

Les électrons peuvent perdre brusquement une partie ou la totalité de leur énergie en passant au voisinage immédiat d'un noyau, il y a alors émission de quanta formant le spectre continu de ralentissement. On voit par exemple sur la planche IV, fig. 7 un électron d'énergie 700.000 *eV* perdant brusquement une énergie de 230.000 *eV* émise très probablement sous forme d'un photon. On peut concevoir que dans le cas où le photon émis a une énergie supérieure à 10^6 *eV*, il subit une matérialisation interne à la surface du noyau qui a provoqué le ralentissement. D'une part le rendement en photons du spectre continu augmente proportionnellement au numéro atomique de l'absorbant, d'autre part le coefficient de matérialisation interne diminue très rapidement lorsque le numéro

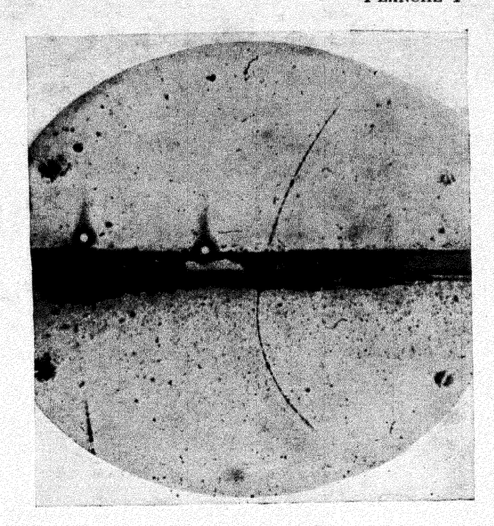


FIG. 1. — Electron positif d'origine cosmique traversant de haut en bas un écran de plomb placé à l'intérieur de la chambre à détente (Anderson).



FIG. 2. — Gerbes d'électrons positifs et négatifs d'origine cosmique (Blackett et Occhialini).

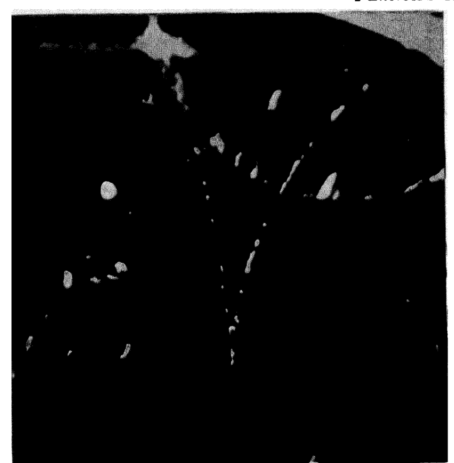


FIG. 3. — Paire d'électrons positif et négatif due à la matérialisation d'un photon de *ThC''* au sein du gaz de la chambre (F. Joliot et I. Curie).



FIG. 4. — Electrons positif et négatif dus à la matérialisation d'un photon de *Po* + *Be* dans le plomb. La source de *Po* + *Be* et l'écran de plomb sont à la partie inférieure de la figure. On voit la trajectoire épaisse d'un proton projeté par un neutron émis par la source (F. Joliot et I. Curie).



FIG. 5. — Paire d'électrons positif et négatif créée aux dépens de l'énergie cinétique d'un électron négatif dont on voit la trajectoire en haut et à droite (Skobelzyn).



FIG. 6. — Electron positif et proton de transmutation de l'aluminium bombardé par les rayons α de *Po*. La source est à la partie inférieure de la figure (F. Joliot et I. Curie).



FIG. 7.— Electrons positifs (à droite) et négatifs (à gauche) émis par une source de *Mg* préalablement irradiée par les rayons α de *Po*. La source est placée à la partie inférieure de la figure (F. Joliot et I. Curie).

atomique augmente. On peut concevoir que ce second processus a une influence prépondérante sur le nombre d'électrons positifs observés en fonction du numéro atomique.

Création de radioéléments émetteurs de positons.

Des expériences effectuées au moyen de l'appareil Wilson placé dans un champ magnétique, nous ont permis de montrer (13) que la transmutation de certains éléments légers par les rayons α s'accompagne de l'émission d'électrons positifs. Le glucinium émet, sous l'action des rayons α du polonium, des électrons positifs et négatifs attribuables à la matérialisation interne du rayonnement γ. Le bore et l'aluminium émettent aussi des électrons positifs sous l'action des rayons α, mais il n'y a pas production simultanée d'électrons négatifs d'énergies comparables à celle des électrons positifs. Cliché 6 (Pl. III).

Nous avons établi par la suite que les positons (17) sont émis par de véritables éléments radioactifs créés à la suite de la transmutation par l'action des rayons α. Par exemple, il se forme dans l'aluminium irradié un noyau instable ${}^{30}_{15}P$ qui se détruit en émettant des positons avec une période de 3 min. 15 sec. et se transforme en un noyau stable ${}^{30}_{14}Si$. A la suite de ces expériences, de nombreux éléments émetteurs de positons ont été découverts en irradiant diverses substances au moyen de protons ou de deutons.

Les radioéléments de ce type nouveau sont absolument semblables aux radioéléments émetteurs de rayons β. L'énergie des positons est répartie suivant un spectre continu, présentant une limite supérieure et un maxi-

mum ; la forme de la courbe de répartition est analogue à celle du spectres continu de rayons β.

Il peut y avoir aussi création de radioélément émetteurs d'électrons négatifs (Pl. IV).

Nous n'insisterons pas ici sur ces phénomènes importants qui seront traités en détail dans une autre brochure.

Dématérialisation des électrons.

Les électrons positifs sont toujours observés très peu de temps après leur création, lorsqu'ils sont encore en mouvement rapide. L'on peut se demander ce qu'ils deviennent lorsqu'ils ont épuisé la majeure partie de leur vitesse. Si les électrons positifs existaient en tant que particules libres ou se liaient à la matière comme les électrons négatifs, ils n'auraient probablement pas échappé jusqu'ici aux observations. L'électron positif pourrait se dissimuler soit en entrant en combinaison avec une autre particule élémentaire, soit en se fixant dans un noyau. Un autre processus de disparition des électrons positifs dérive de la théorie des électrons de Dirac. Selon cet auteur, il y aurait deux possibilités d'annihilation que l'on peut résumer ainsi :

1° Un électron positif peut disparaître en même temps qu'un électron libre au repos, qu'il rencontre, en donnant naissance à deux photons. Cette dématérialisation s'effectuant principalement lorsque le positon a perdu sa vitesse, les deux photons sont émis suivant des directions opposées et ont des énergies égales à 500 *KVe* (énergie équivalente à la masse au repos de chaque électron), conformément aux principes de conservation de l'énergie et de l'impulsion.

2° Si l'électron positif disparaît en rencontrant un électron fortement lié au noyau, lequel en raison de sa grande masse prendra une impulsion notable, mais une énergie négligeable, un photon unique sera émis dont l'énergie est de 10^6 *eV*, équivalente à la somme des masses des deux électrons.

La probabilité de ce second processus, calculée théoriquement par Fermi et Uhlenbeck (18) est beaucoup plus petite (environ 1/1000) que celle du premier processus.

Enfin, Francis Perrin (19) a envisagé d'autres modes d'annihilation. En particulier, l'électron positif peut rencontrer un électron négatif au voisinage d'un autre électron, dans ce cas, un seul photon est émis, son énergie étant 680 *KVe*, tandis qu'un des électrons négatifs est projeté.

La supposition suivant laquelle la dématérialisation s'effectue principalement lorsque l'électron positif a perdu la majeure partie de sa vitesse résulte du calcul, effectué par Dirac, de la probabilité d'annihilation de l'électron positif se déplaçant dans un milieu de densité électronique donné. Ces calculs ont été reportés par Blackett et Occhialini dans leur mémoire (2) sur l'étude des gerbes d'électrons provoquées par les rayons cosmiques. D'après Dirac, la section efficace de choc d'un électron positif de vitesse v, contre un électron négatif libre, pour que l'annihilation ait lieu, est donnée par l'expression

$$s = \frac{\pi e^4}{m_0^2 c^4} \left[\frac{1}{1+\gamma} \left\{ \frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \log_e (\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right\} \right]$$

dans laquelle $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, c est la vitesse de la lumière m et e la masse et la charge de l'électron. Le libre par cours λ de l'électron positif dans un milieu où le nombre

d'électrons est n par centimètre cube sera $\lambda = \frac{1}{n\,s}$. Pour un électron de 2×10^6 eV, s aura pour valeur $0,115 \times 10^{-24}$ cm^2 et le libre parcours sera 3 cm. 15 dans le plomb et 26 cm. dans l'eau. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que le parcours effectif de cet électron dans les milieux envisagés (0 cm. 07 dans le plomb et 0 cm. 9 dans l'eau). On peut dresser un tableau des diverses valeurs calculées de λ et des valeurs expérimentales du parcours pour diverses énergies cinétiques des électrons s'étendant de 3.000 KVe à 10 KVe. La probabilité d'annihilation P, d'un électron positif lorſque son énergie cinétique décroît de la valeur W_1 à la valeur W_2 en raison de son ralentissement dans la matière, est donnée par $log \left[1 - P\frac{W_2}{W_1}\right] = \int_{W_1}^{W_2} \frac{dr}{\lambda}$. Connaissant la fonction $\frac{1}{\lambda} = f(r)$ à l'aide des valeurs du tableau précédent, on peut intégrer graphiquement le second nombre. On trouve, par exemple, pour P la valeur 16 %, l'énergie de l'électron positif décroissant de 3.000 eKV à 10 eKV dans l'eau. Cette probabilité a la valeur de 36 %, quand l'énergie de l'électron positif décroit de 200×10^6 eV à $0,1 \times 10^6$ eV. Le calcul de la probabilité d'annihilation par unité de temps conduit à une conclusion intéressante. Cette probabilité peut être estimée en calculant le rapport $\frac{P(W_1,\ W_2)}{\Delta t}$, Δt étant le temps mis par l'électron pour que son énergie cinétique passe de la valeur W_1 à la valeur W_2, P étant la probabilité d'annihilation précédemment calculée. On trouve que ce rapport augmente lorsque l'énergie des électrons positifs diminue et il atteint une valeur constante environ $2,9 \times 10^9$ sec^{-1} à partir d'une énergie W_1 égale à 100 KVe. Comme le font remarquer Blackett et Occhialini, les électrons positifs disparaissent alors au cours du temps

dans un milieu donné, suivant une loi analogue à celle qui régit la désintégration d'une substance radioactive en fonction du temps. On peut définir la constante de dématérialisation Λ par la relation $\frac{dN}{Ndt} = -\Lambda = -2{,}9 \times 10^{-9} sec^{-1}$ N étant le nombre d'électrons positifs à l'instant t, dN le nombre de ceux qui se dématérialisent pendant le temps dt. La vie moyenne θ de l'électron positif se déplaçant dans l'eau, est $\theta = \frac{1}{\Lambda} = 3{,}5 \times 10^{-10} sec$; elle serait de $3{,}8 \times 10^{-11}$ *sec.* dans le plomb. Elle est inversement proportionnelle à la densité électronique du milieu.

Ces durées de vie moyenne sont notablement supérieures aux temps mis par l'électron pour effectuer son parcours dans les absorbants. Par exemple, la durée du trajet mesurable d'un électron positif de 3×10^6 *eV* dans le plomb est de l'ordre de $0{,}7 \times 10^{-11}$ *sec.*, valeur plus petite que la vie moyenne. En définitive, si la théorie est exacte, on doit observer, en absorbant les électrons positifs dans la matière, l'émission par celle-ci d'un spectre continu de photons présentant un maximum aigu d'intensité, très voisin de 500 *KVe*, limite inférieure du spectre.

La seule présomption en faveur de la théorie de la dématérialisation des électrons, résultait des expériences sur l'absorption des photons de grande énergie par les éléments lourds. On sait que pour le rayonnement γ de *ThC''* d'énergie quantique $2{,}65 \times 10^6$ *eV*, le coefficient d'absorption par électron augmente notablement avec le numéro atomique de l'absorbant. Ce coefficient devrait être sensiblement indépendant de la charge du noyau, car on sait que l'absorption par effet Compton est dans ce cas très supérieure à l'absorption par effet photoélectrique, même pour les éléments lourds. On a calculé qu'il existe pour les

photons de grande énergie, une absorption supplémentaire, d'autant plus importante que le noyau absorbant est plus lourd et que l'énergie du photon est plus élevée. Les expériences décrites au début de cet opuscule permettent d'affirmer qu'une partie importante de l'absorption supplémentaire est due à la matérialisation des photons en électrons positifs et négatifs.

Les électrons positifs ainsi matérialisés peuvent être absorbés dans le radiateur et si la théorie de Dirac est exacte, leur annihilation doit donner lieu à l'émission d'une radiation de 500 *KVe*.

Gray et Tarrant (20) signalèrent qu'un élément lourd, le plomb, irradié par les photons de *ThC''* ($2{,}65 \times 10^6$ *ev*) reémet une radiation de 500 *KVe* et de 1.000 *KVe* (celle-ci dans la proportion de 1/6 de la première) et ils supposèrent que ces rayonnements correspondaient à l'annihilation des électrons positifs ayant pris naissance dans le plomb. Si cette interprétation est possible, comme nous venons de le voir, en ce qui concerne la radiation de 500 *KVe*, plusieurs auteurs sont d'accord sur ce point, il semble qu'elle ne puisse convenir pour la composante plus pénétrante, l'intensité observée étant beaucoup plus élevée que ne le laisse prévoir la théorie. Nous avons vu plus haut que la probabilité d'annihilation avec émission d'un seul photon de 10^6 *eV* est 1.000 fois plus petite que la probabilité d'annihilation avec émission de deux photons de 500 *KVe*. Enfin, les auteurs ne sont pas d'accord sur la valeur de l'énergie de la composante pénétrante, les valeurs trouvées s'échelonnant entre 10^6 *eV* et $2{,}6 \times 10^6$ *eV*.

Il était important d'obtenir une preuve plus directe de l'annihilation des positons en absorbant un faisceau de ces particules dans une matière donnée et en examinant le rayonnement qu'elle pouvait émettre. Des expériences sur

ce sujet ont été entreprises indépendamment par J. Thibaud (21) et par l'un de nous (22). Nous décrivons ici les expériences faites à l'Institut du Radium.

Les positons issus d'une lame d'aluminium irradiée par les rayons α du polonium sont concentrés, selon la méthode que M. J. Thibaud avait déjà utilisée pour l'évaluation du rapport $\frac{e}{m}$ de l'électron positif, sur un radiateur de *Pb* ou d'*Al* placé au-dessus d'un compteur Geiger-Müller. Lorsque

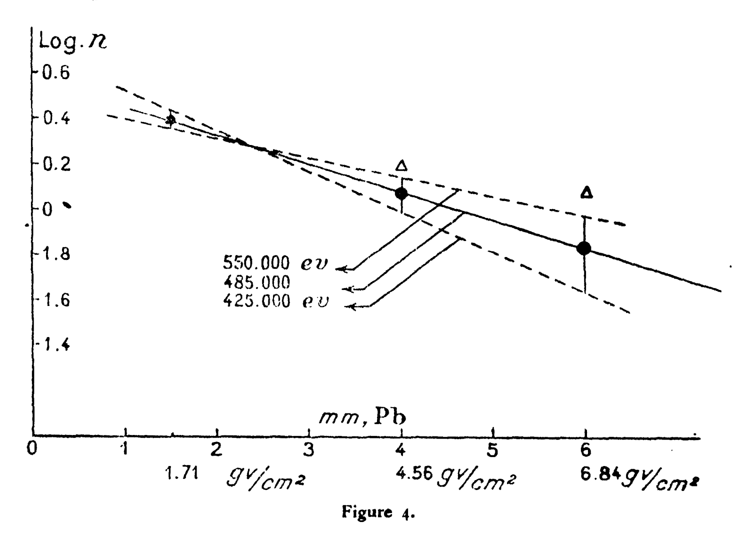


Figure 4.

tous les positons sont arrêtés par le plomb, on observe qu'il en jaillit un rayonnement γ dont l'intensité décroit lorsqu'on interpose entre le radiateur et le compteur des épaisseurs croissantes de plomb. La courbe de la figure 4 représente la variation du logarithme de l'intensité en fonction des épaisseurs de plomb. Les segments de droites passant par chaque point expérimental représentent les limites d'erreur. Le coefficient d'absorption massique de la radiation, vraisemblablement mono-chromatique, est com-

pris entre 0,19 et 0,32 ce qui correspond à une énergie quantique de 485 ± 60 *KVe*. Cette valeur est très proche de 500 *KVe*, en accord avec les prévisions de la théorie de Dirac.

Une autre partie de l'expérience consiste à déterminer le nombre de photons correspondant à l'annihilation d'un positon. A l'aide du compteur, on a déterminé le nombre des positons qui atteignaient le radiateur et le nombre de photons décelés par l'appareil, lequel n'est qu'une petite fraction du nombre total des photons correspondant à la dématérialisation des positrons. La valeur de cette fraction a été obtenue soit par le calcul, soit en mesurant le nombre d'impulsions données par le compteur en plaçant une source de 3×10^{-7} gr. de *Ra* sur le radiateur à l'endroit où arrivent les posittons. Cette détermination fait intervenir le nombre total de photons γ émis par l'étalon de radium, nombre d'ailleurs connu avec une faible précision. En utilisant les valeurs des intensités absolues des principales raies γ du spectre $RaB + C$ corrigées de l'absorption que peuvent subir ces rayons avant de pénétrer dans le compteur, on trouve que le nombre n de photons émis dans l'angle 4π correspondant à la dématérialisation d'un positon est compris entre 1,6 et 3 ; soit une valeur probable voisine de 2.

Pour confirmer la totalité des prévisions de la théorie de Dirac il resterait à déterminer expérimentalement la durée de la vie moyenne des électrons positifs. Les expériences précédentes ne permettent pas d'atteindre cette valeur, même en ce qui concerne l'ordre de grandeur. En effet, l'énergie des photons, 500 *KVe*, indique que les positons se dématérialisent principalement après avoir épuisé la majeure partie de leur vitesse ; ces expériences nous laissent dans l'ignorance du temps pendant lequel le positon a pu

survivre après s'être arrêté et qui peut être très supérieur, d'après ce que nous avons vu, à celui nécessaire pour accomplir le parcours mesurable. C'est probablement en examinant par la méthode Wilson les cas d'arrêt brusque d'un électron positif, dont on connaît l'énergie cinétique au sein du gaz de la chambre, que l'on pourrait atteindre la probabilité d'annihilation pour un électron positif entre deux valeurs de l'énergie cinétique. C'est aussi par la méthode Wilson que l'on pourrait étudier le processus d'annihilation envisagé par Francis Perrin.

La confirmation expérimentale du phénomène de dématérialisation des électrons, donne un nouvel appui à la supposition suivant laquelle les masses au repos des deux électrons sont égales. On peut dire actuellement que les expériences relatives à la matérialisation des photons et à la dématérialisation des électrons permettent d'affirmer l'égalité des rapports $\frac{e}{m}$ de ces particules à moins de 10 % près.

L'électron positif dans la nature.

Nous venons de voir que l'électron positif ne peut subsister à l'état libre et se recombine avec un électron négatif pour donner une radiation électromagnétique ; bien que les expériences ne nous indiquent pas sa vie moyenne, nous pouvons légitimement supposer qu'elle est très faible et que la matière ne contient pas pratiquement de positrons à l'état libre.

Par contre on peut se demander si l'électron positif n'intervient pas dans la constitution nucléaire. Nous avons émis l'hypothèse que le proton pouvait être complexe, constitué par un neutron et un positon. M. Jean Perrin a suggéré que l'on pourrait considérer le neutron et l'électron

positif comme les seuls éléments constitutifs du noyau.

Cependant l'analogie entre la radioactivité avec émission de rayons β et la radioactivité accompagnée de l'émission de positons nous fait actuellement penser, en accord avec les conceptions de Heisenberg, que les noyaux sont formés de neutrons et de protons. Un neutron pourrait se transformer en proton à l'intérieur du noyau avec expulsion d'un électron négatif. Réciproquement un proton pourrait se transformer en neutron, avec expulsion d'un électron positif ; il ne serait pas possible de dire si chacune de ces particules est simple ou complexe. Les transformations devraient être accompagnées de l'émission d'un neutrino, particule non observée jusqu'ici mais dont l'existence paraît nécessaire pour assurer la conservation de l'énergie et du spin dans la réaction.

De telles transformations se produisent peut être aussi à l'extérieur du noyau.

L'électron positif n'existerait donc ni à l'état libre, ni à l'intérieur des noyaux. Cependant, inconnu il y a seulement trois ans, il joue aujourd'hui un rôle important dans la physique nucléaire. Nous connaissons actuellement plusieurs manières de le produire et il n'y a aucun doute que l'on en découvrira encore de nouvelles.

On peut s'attendre à le voir apparaître, en même temps qu'un électron négatif, par matérialisation de l'énergie, toutes les fois qu'une énergie de plus de un million d'électron-volts peut être dissipée en un seul processus élémentaire. Comme la dématérialisation, qui suit presque immédiatement, donne un rayonnement de 500.000 eV, nous voyons donc là un des nombreux modes de dégradation de l'énergie.



BIBLIOGRAPHIE

1. ANDERSON. *Phys. Rev.* (1933), **48**, p. 491.
2. BLACKETT et OCCHIALINI. *Proc. Roy. Soc.*, **139** (1933), p. 699.
3. L. MEITNER et K. PHILIPP. *Naturw.*, **21** (1933), p. 286.
4. CHADWICK, BLACKETT et OCCHIALINI. *Nature*, **131** (1933), p. 473.
5. IRÈNE CURIE et F. JOLIOT. *Exposés de Physique Théorique*, Hermann (1933), p. 21.
6. IRÈNE CURIE et F. JOLIOT. *C. R.* (1933), **196**, 1.105.
7. ANDERSON et NEDDERMEYER. *Phys. Rev.* (1933), **43**, 1.034.
   IRÈNE CURIE et F. JOLIOT. *C. R.* (1933), **196**, 1.581.
   L. MEITNER et K. PHILIPP. *Naturw.*, **24** (1933), 468.
8. GRINBERG. *C. R.* **197** (1933), 318.
9. CHADWICK, BLACKETT et OCCHIALINI. *Proc. Roy. Soc.*, **144** (1934), 235.
10. J. THIBAUD. *C. R.* (1933), **197**, p. 447 et p. 915.
11. GENTNER. *C. R.* (1933), **197**, 403.
12. OPPENHEIMER et PLESSET. *Phys. Rev.*, **44** (1933), 53.
13. IRÈNE CURIE et F. JOLIOT. *J. de Phys. et Rad.* (1933) IV, 494.
14. NEDELSKY et OPPENHEIMER. *Phys, Rev.*, **44** (1933), 948.
15. SKOBELZYN. *Nat.* (1934), **133**, 23.
16. SKOBELZYN et STEPANOWA. *Nat.* (1934), **133**, p. 565 et p. 646.
17. IRÈNE CURIE et F. JOLIOT. *C. R.* **198** (1934), 254.
18. E. FERMI et UHLENBECK. *Phys. Rev.* **44** (1933), 510.
19. F. PERRIN. *C. R.* **197** (1933), 1.302.
20. GRAY et TARRANT. *Proc. Roy. Soc.*, **143** (1934), 681.
21. J. THIBAUD. *C. R.* **197** (1933), 1.629.
22. F. JOLIOT. *C. R.*, **197** (1933), 1.622. *J. de Phys. et Rad.* (1934) V, 299.